Bewegte Ladungen in Feldern – Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum

Im Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) werden Behandlungen mit Protonenstrahlung durchgeführt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Strahlung punktgenau auf das erkrankte Gewebe ausgerichtet werden kann und das umliegende, gesunde Gewebe geschont wird. Dafür müssen die Protonen durch elektrische und magnetische Felder beschleunigt und gelenkt werden. In Material 1 ist der Aufbau des HIT im Gebäudeplan dargestellt.

Aufgaben

1 Zunächst wird die Erzeugung des Protonenstrahls genauer betrachtet. Bei der Strahlerzeugung werden Wasserstoffatome durch Stöße mit Elektronen ionisiert und die so entstandenen Protonen durch ein elektrisches Feld beschleunigt. In Material 2 ist der Aufbau vereinfacht dargestellt. Die Ionisierungsenergie von Wasserstoff beträgt 13,6 eV. Die elektrischen Felder zwischen Glühkathode, Anode und Extraktionskathode können als homogen angenommen werden.

1.1 Erläutern Sie die Polung der beiden elektrischen Spannungen U_1 und U_2.
Geben Sie die Spannung U_1 an, die mindestens benötigt wird, um die Wasserstoffatome zu ionisieren.

(5 BE)

1.2 Die Protonen werden mit einer Spannung von $U_2 = 90$ kV beschleunigt.

1.2.1 Vereinfachend soll zunächst angenommen werden, dass die Protonen ohne Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt werden. Berechnen Sie die Geschwindigkeit der Protonen nach dem Durchlaufen der gesamten Beschleunigungsspannung.

(3 BE)

1.2.2 Genaue Messungen zeigen, dass die Protonen eine Anfangsgeschwindigkeit v_0 besitzen, die im Eintrittspunkt in die Extraktionskammer in unterschiedliche Raumrichtungen ausgerichtet sein kann. Untersuchen Sie, wie die Gesamtenergie der Protonen nach Durchlaufen der Spannung U_2 berechnet werden muss, wenn der Vektor der Anfangsgeschwindigkeit
I: in Beschleunigungsrichtung,
II: senkrecht zur Beschleunigungsrichtung ausgerichtet ist.

(5 BE)

1.3 Begründen Sie, dass ein magnetisches Feld unabhängig vom Winkel zwischen den Magnetfeldlinien und dem Geschwindigkeitsvektor der Protonen nicht dazu geeignet ist, die kinetische Energie der Protonen zu erhöhen.

(5 BE)

2 Nach der Vorbeschleunigung treten die Protonen in das Synchrotron ein (Material 1, Nr. 3). Dies ist ein Ringbeschleuniger, in dem die Teilchen abwechselnd geradlinig beschleunigt und kreisförmig abgelenkt werden. Um dies zu erreichen, müssen die Protonen in sechs Umlenkbereichen einen Kreisbogen mit einem festen Radius durchlaufen, in dem sie um jeweils 60° abgelenkt werden. Durch das mehrfache Durchlaufen des Synchrotrons erreichen die Teilchen sehr hohe Geschwindigkeiten.

2.1 Geben Sie die Richtung der Magnetfeldlinien im Synchrotron an, wenn die Protonen das Synchrotron im Uhrzeigersinn durchlaufen.
Leiten Sie für den Radius der Kreisbahn für Protonen der Geschwindigkeit v in einem homogenen Magnetfeld der magnetischen Flussdichte[1] B die Formel $r = \frac{m_p \cdot v}{e \cdot B}$ her.

(4 BE)

2.2 Erläutern Sie, wie die Flussdichte des Magnetfelds im jeweils nächsten durchlaufenen Umlenkbereich erhöht werden muss, damit der Radius des durchlaufenen Kreisbogens unverändert bleibt.

(3 BE)

2.3 Im Synchrotron werden die Protonen auf eine Energie von bis zu 220 MeV beschleunigt. Diese Energie erreichen sie beim Eintritt in den letzten Umlenkbereich. Berechnen Sie für diese Protonenenergie nicht-relativistisch die Geschwindigkeit der Protonen und die in diesem Umlenkbereich benötigte Flussdichte des Magnetfelds, um die Protonen auf einem Kreisbogen mit dem Radius von $r = 5{,}20\,\text{m}$ zu halten.

(6 BE)

2.4 Aus technischen Gründen können weder die elektrische Feldstärke in den Beschleunigungsstrecken noch die magnetische Flussdichte in den Umlenkbereichen des Synchrotrons beliebig erhöht werden. Beurteilen Sie, welche dieser beiden Beschränkungen die maximal erreichbare Teilchenenergie am Ausgang des Synchrotrons beeinflusst.

(5 BE)

2.5 Die Protonen verlassen das Synchrotron mit etwa 75%iger Lichtgeschwindigkeit in horizontaler Richtung und werden mit konstanter Geschwindigkeit zu den Bestrahlungsplätzen gelenkt. Der Abstand zwischen Austritt aus dem Synchrotron und den Bestrahlungsplätzen beträgt $s = 30\,\text{m}$. Berechnen Sie die vertikale Abweichung des Protonenstrahls von der Horizontalen, die sich aufgrund der Gravitationskraft ergibt, und beurteilen Sie die Größe der Abweichung in Bezug auf ihre Auswirkung auf die Strahlentherapie. Eine relativistische Berechnung soll nicht erfolgen.

(6 BE)

3 Bei der Durchführung der Behandlung ist eine Variation der Protonengeschwindigkeit zur Bestrahlung unterschiedlicher Gewebetiefen notwendig. Es wird ein Geschwindigkeitsfilter (Material 3) genutzt, damit nach dem Durchlaufen des Filters nur noch Protonen mit einer bestimmten Geschwindigkeit im Strahl vorhanden sind.

3.1 Zeichnen Sie die Vektoren der Protonengeschwindigkeit und der wirkenden Kräfte auf ein Proton ein, das den Filter geradlinig durchläuft.

(3 BE)

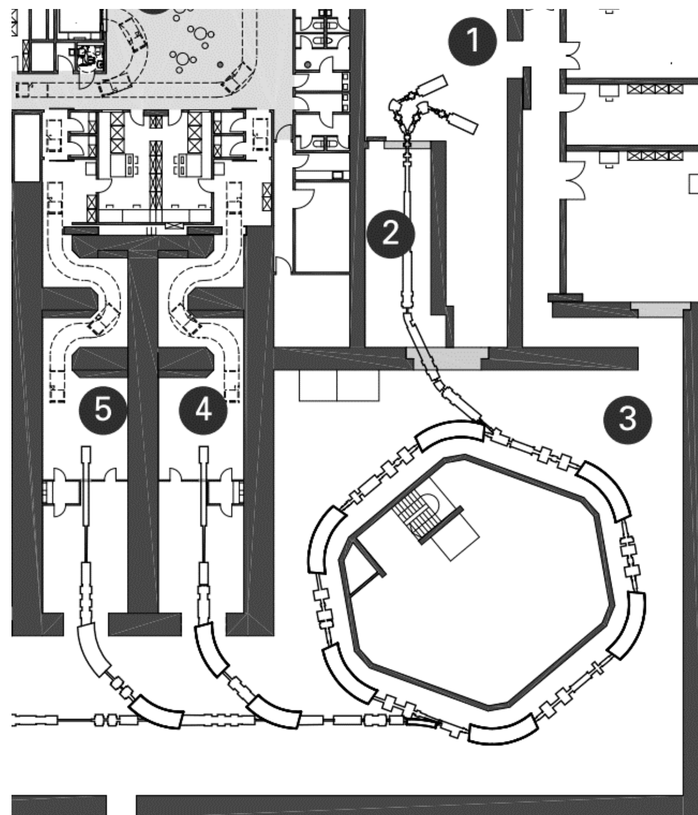
3.2 Begründen Sie, dass unabhängig von der Masse und der Ladung nur Teilchen mit einer bestimmten Geschwindigkeit v_0 den Filter geradlinig passieren. Erläutern Sie, wie Teilchen mit Geschwindigkeit $v_1 > v_0$ den Geschwindigkeitsfilter durchlaufen.

(5 BE)

[1] Die magnetische Flussdichte wird in manchen Lehrbüchern auch als magnetische Feldstärke bezeichnet.

Material 1

Gebäudeplan des Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrums



Legende:

1 Protonenquelle und Strahlerzeugung

2 Vorbeschleunigung und Strahlführung zum Synchrotron

3 Synchrotron (ringförmiger Teilchenbeschleuniger). Die Protonen werden hier abwechselnd beschleunigt und auf Kreisbögen um 60° abgelenkt. Die Beschleunigung der Protonen findet in den geraden Segmenten des Synchrotrons statt. In den Umlenkbereichen sind Magnete zur Ablenkung der Protonen angebracht. Sie durchlaufen den Ring mehrmals und erreichen so sehr hohe Energien.

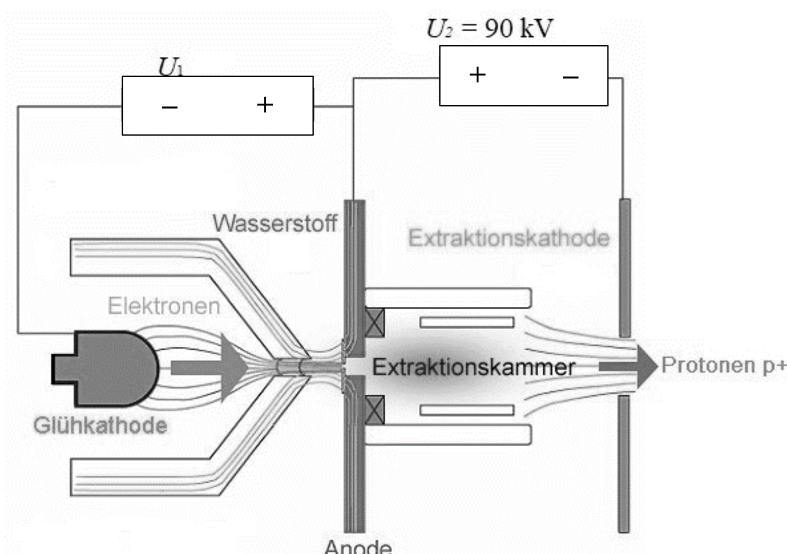
4 Bestrahlungsplatz 1

5 Bestrahlungsplatz 2

URL: https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/fileadmin/pressestelle/PM_neu/Bauamtsbroschuere.pdf (abgerufen am 24.10.2021).

Material 2

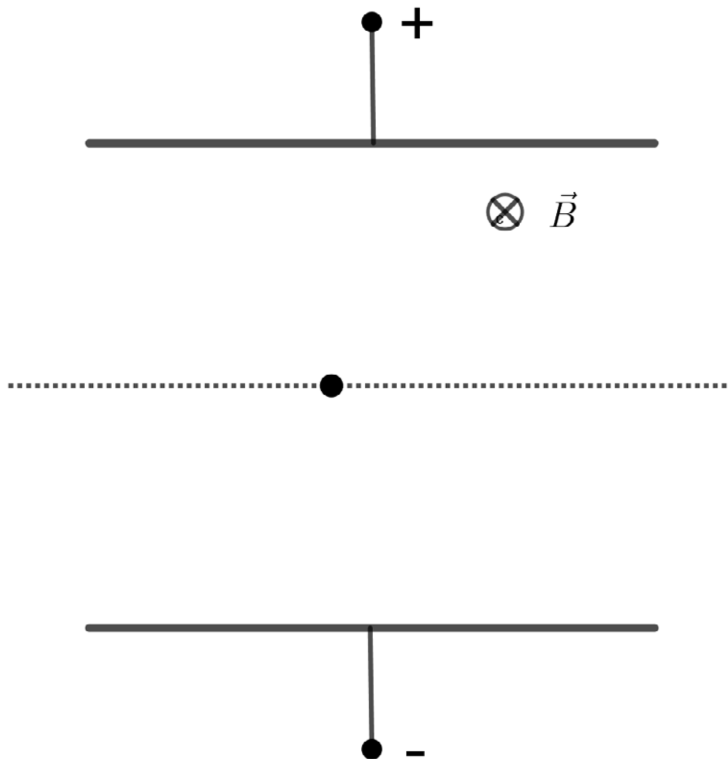
Aufbau zur Strahlerzeugung



URL: https://www.lhc-facts.ch/index.php?page=protonen (abgerufen am 29.06.2022).

Material 3

Geschwindigkeitsfilter



Das homogene magnetische Feld zeigt in die Zeichenebene und erfüllt den gesamten Raum des Kondensators. Im Bereich zwischen den Kondensatorplatten ist das elektrische Feld ebenfalls als homogen anzusehen.